EXPANSÃO DA REDE DE CANAIS E A HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA EM CABECEIRAS DE DRENAGEM: MECANISMOS EROSIVOS ASSOCIADOS AOS VOÇOROCAMENTOS NO MÉDIO VALE DO RIO PARAÍBA DO SUL

Otavio Miguez da ROCHA-LEÃO[1]
Paulo Jorge Vaitsman LEAL[2]
Ana Luíza COELHO-NETTO[3]

RESUMO

A propagação de voçorocas em cabeceiras de drenagem do médio vale do Rio Paraíba do Sul vem sendo investigada pelo laboratório de Geo-hidroecologia/UFRJ. Nesse trabalho discute-se o papel do recuo remontante do canal de uma voçoroca-piloto na hidrologia subterrânea das cabeceiras da Estação Experimental da Fazenda Bela Vista (EEBV). Discute-se ainda, o significado dessas alterações nos gradientes hidráulicos e na produção de fluxos sub-superficiais responsáveis pela progressão remontante da voçoroca. Investiga-se também as relações entre as entradas de chuva locais e regionais e o comportamento da água subterrânea nas cabeceiras da EEBV.

Registrou-se um atraso de dois meses entre o início da estação chuvosa e a elevação dos valores de carga de pressão no aqüífero regional, sendo que o pico das cargas de pressão só foi atingido de 5 à 6 meses após o inicio das estações chuvosas. No eixo-tronco central da voçoroca, as taxas de incisão linear no canal foram da ordem de 385mm/ano entre 1982 e 1990 e da ordem de 251mm/ano entre 1990 e 2001. Nesse período o nível de base local situado na porção superior da voçoroca recuou 55m no sentido remontante, promovendo a intensificação da dissecação dos canais-dígitos tributários. No canal-dígito ativo a incisão foi da ordem de 336mm/ano e no dígito semi-estabilizado foi de 93mm/ano. Essa dissecação no interior da voçoroca acarretou em taxas de recuo da ordem de até 57m2/ano no dígito ativo, principalmente durante a década de 1990, quando as taxas de recuo remontante se aceleraram mesmo com a diminuição da área de contribuição de drenagem que passou de 42.392 m2 em 1982 para 9.972 m2 em 2001.

A incisão linear associada a progressão remontante da voçoroca incrementou o gradiente topográfico de 0.23 para 0.31 na encosta localizada a montante do canal-dígito ativo, além de provocar um rebaixamento do nível freático. Entre 1996 e 2003 essas modificações ocasionaram um aumento no gradiente hidráulico entre as estações 2 e 6 que passou de 0,18m/m para 0,27m/m aumentando a possibilidade de pirataria da água subterrânea de um vale vizinho que é suspenso topograficamente.

Considerando os atuais registros de campo sobre a hidrologia subterrânea, que refletem uma fase do voçorocamento posterior ao rebaixamento do nível freático das cabeceiras, e baseando-se no modelo evolutivo de progressão de voçorocas sugerido por COELHO NETTO et al (1988), propõe-se as seguintes etapas na dinâmica evolutiva da voçoroca da EEBV nos últimos 25 anos:

1 – Fase de aceleração nas taxas de recuo – Cobertura de gramíneas com a proliferação das formigas saúva, que ao escavarem o solo promovem a formação de dutos de

[1] Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Professor Doutor, rochale@uerj.br
[2] Doutorando do PPGG/UFRJ, Pesquisador do GEOHECO, pjleal@centroin.com.br
[3] Universidade Federal do Rio de Janeiro, Professora Titular, Coordenadora do GEOHECO ananetto@acd.ufrj.br

percolação preferencial, promove altas taxas de recarga local para os fluxos sub-superficiais, responsáveis pela progressão da voçoroca.

2 – Fase de intensificação da incisão linear – Entre 1982 e 1991 a taxa de incisão linear no canal da voçoroca foi 3.08 m. Entre 1991 e 2001 a taxa de incisão linear foi de 2,76m. Integrando-se os dois períodos percebe-se que a incisão linear na porção superior do canal da voçoroca foi de 5,84 m.

Esse processo pode ter favorecido a pirataria de água subterrânea das cabeceiras adjacentes, devido ao incremento no gradiente hidráulico, que aumentou a vazão de descarga dos fluxos sub-superficiais que afloram nas faces de exfiltração e que são responsáveis pela aceleração nas taxas de recuo remontante da voçoroca, mesmo com a aproximação dos divisores topográficos.

3 – Fase de relativa estabilização dos canais-dígitos - Após a fase anterior, quando a aceleração nas taxas de recuo remontante provocou o rebaixamento do nível freático da cabeceira, registrou-se um período de desaceleração nas taxas de recuo nos canais dígitos da porção superior da voçoroca, provavelmente provocado pelo rebaixamento da franja capilar do aqüífero regional e a conseqüente ampliação da zona não saturada do solo.

INTRODUÇÃO

Os voçorocamentos em cabeceiras de drenagem vêm sendo tradicionalmente abordados como um importante problema para a sociedade, devido, principalmente, a degradação de terras produtivas e a exportação de sedimentos que são responsáveis por assoreamentos de canais fluviais e barragens. Atualmente discute-se também as conseqüências desses voçorocamentos na preservação de recursos hídricos, já que os sedimentos erodidos alteram a qualidade da água e aumentam os custos para sua utilização.

O controle desses voçorocamentos torna-se fundamental não somente pelas perdas de terras produtivas e assoreamento dos sistemas fluviais e barragens, mas sobretudo, para a proteção da funcionalidade hidrológica dessas cabeceiras de drenagem, fundamentais para um gerenciamento racional dos recursos hídricos.

Muito embora já existam soluções de engenharia para contenção de voçorocas, (re-taludamento, controle de drenagem, filtros de areia e brita, muros de gabiões e etc...) o custo dessa obras pode inviabilizar essas soluções em áreas rurais e/ou pouco valorizadas. Nessas condições, torna-se importante o desenvolvimento de conhecimento para alimentar a avaliação de áreas mais suscetíveis ao voçorocamento, ou a expansão dessas feições erosivas.

Dessa forma, os estudos sobre mecanismos erosivos associados a propagação de voçorocas tornam-se fundamentais para à prevenção e\ou desenvolvimento de tecnologia de controle de voçorocamento de baixo custo, especialmente por revegetação.

Para se controlar efetivamente a dinâmica erosiva nas encostas através da revegetação é necessário conhecer e explicar os processos e os mecanismos que operam a hidrologia e a atividade erosiva associada, buscando-se identificar a funcionalidade hidrológica da cobertura vegetal.

No caso dos voçorocamentos, onde o mecanismo erosivo principal associa-se a exfiltração de fluxos dágua sub-superficiais (DUNNE 1970; COELHO NETTO et al 1988), torna-se fundamental a compreensão da influencia dos diferentes tipos de vegetação (inclusive em seus distintos estágios sucessionais) nos processos de infiltração e percolação da água no solo, nas encostas situadas a montante desses voçorocamentos que constituem a zona de recarga dos fluxos sub-superficiais.

Os processos que controlam a descarga de fluxos subterrâneos pela zona saturada são fundamentais para determinação do volume de vazão nos canais fluviais, afetando dessa forma os processos gerais de dissecação do relevo. Em cabeceiras de drenagem com voçorocamentos profundos, que atingem o aqüífero regional, essa descarga pode ser considerada o principal fator na propagação dessas feições erosivas (COELHO NETTO et al, 1988).

Os volumes de descarga dos fluxos subterrâneos podem variar muito ao longo do ano, respondendo as diferentes taxas de infiltração e percolação nas zonas de recarga, que são associadas às variações sazonais no regime pluviométrico (DUNNE 1980). A elevação do nível freático regional após a temporada de chuvas com posterior retorno a níveis mais rebaixados durante as estiagens, é uma característica de bacias localizadas sobre regimes climáticos sazonais e/ou marcados por diferenças significativas nas taxas de precipitação ao longo do ano. Nesses casos pode-se estabelecer diferenças significativas no gradiente hidráulico entre os períodos úmidos e secos, afetando a dinâmica dos fluxos sub-superficiais e os processos erosivos e deposicionais associados.

Algumas voçorocas por serem controladas por fluxos subterrâneos dos aqüíferos regionais, muitas vezes originados de fluxos artesianos por sistemas de fraturas no substrato rochoso, podem não sofrer influência somente da zona de recarga das encostas. Portanto, uma questão que se coloca diz respeito às relações entre a recarga dos aqüíferos locais e as entradas de chuvas locais e regionais, e suas implicações para os mecanismos erosivos associados aos voçorocamentos.

Os voçorocamentos constituem-se em um dos principais processos atuais de dissecação do relevo, sendo fundamentais na expansão da rede de canais e na evolução geomórfica das bacias de drenagem. Ocorrem ainda, sob as mais distintas condições climáticas e geológicas, em áreas urbanas e rurais em muitas regiões do Planeta. Por esse motivo nos últimos anos vem sendo amplamente estudados os processos e mecanismos associados a gênese e evolução dessas feições erosivas.

BLONG et al (1982) discute os processos associados ao desenvolvimento de voçorocas nas encostas, apontando para ação combinada da incisão linear e do recuo lateral da parede do canal inciso, promovido pelo colapso do material devido ao solapamento da parede (sidewal). O autor indica ainda, que medidas de controle de voçorocamento podem ser bem sucedidas se evitarem o solapamento da base das paredes da voçoroca, reduzindo o recuo lateral.

As voçorocas podem ocorrer em diferentes posições na paisagem geomorfológica e esse fato levou a uma tipologia de voçorocas baseada em sua localização topográfica. Dentro de um vale as voçorocas podem situar-se em suas encostas laterais, nas encostas frontais das cabeceiras ou no eixo principal da concavidade, (BRICE, 1966). Destaca-se ainda que essas voçorocas podem apresentar bifurcações, propagando dígitos e também progridem remontante nas encostas adjacentes.

BURKARD & KOSTASCHUK (1997) em pesquisas conduzidas sobre taxas de expansão de voçorocas baseados em interpretação de fotografias aéreas entre 1930 e 1992 no Canadá, apontam que as maiores taxas de expansão foram observadas nas maiores bacias, devido a maior área de contribuição de drenagem para a cabeça das voçorocas. Os autores apontam ainda para as características climáticas, de cobertura vegetal e de manejo das terras como fatores que controlam as taxas de expansão das voçorocas.

Hidrologia sub-superficial e mecanismos erosivos

DUNNE (1990) definiu dois diferentes mecanismos erosivos associados aos fluxos sub-superficiais**.** O primeiro refere-se ao mecanismo de erosão por vazamanto ou exfiltração (*seepage erosion*) que envolve o desenvolvimento de uma força crítica que remove partículas de solo ou rocha a partir da exfiltração (emersão) da água de dentro do meio poroso, causando liquefação. Um segundo mecanismo foi definido como lavagem em túneis

(*tunnel scour)* que se associa a aplicação de uma força de cisalhamento nas margens de um macro-poro.

Segundo DUNNE (1970) a superfície de solo por onde o fluxo subterrâneo exfiltra, ou seja, aflora na superfície, será denominada face de exfiltração, podendo acontecer em um segmento da encosta, em cortes de estrada, paredes de voçorocas e barrancos em margens de rios.

DUNNE (1990) descreve uma percolação preferencial da água no solo através de macro-poros interconectados, formados a partir da própria dinâmica de escoamento da água no solo, ou mesmo por origem biológica (fauna escavadora e dutos de raízes mortas). Esses caminhos preferenciais, onde a água fica menos sujeita as forças de retenção da zona não saturada do solo, foram denominados de *pipe*, sendo o fluxo que se desenvolve em seu interior denominado *pipeflow*.

Esses mecanismos descritos por DUNNE (1970) podem provocar a progressão remontante das encostas devido à formação de túneis erosivos com posterior solapamento e desabamentos. Esse processo de recuo lateral de encostas pode acontecer de diferentes formas, envolvendo movimentos de massa e voçorocas (DUNNE, op cit).

JONES (1990) discute o efeito do fluxo pelos *pipes* no modelado de regiões úmidas, apontando que esses dutos se formam em solos susceptíveis a formação de macro-poros, geralmente quando os horizontes do solo apresentam uma redução significativa na permeabilidade em algum ponto do perfil do solo. Nesses casos, quando a camada sobrejacente a zona menos permeável apresenta significativa permeabilidade lateral, são formados gradientes hidráulicos que permitem o fluxo da água e produzem canais de percolação preferencial dentro do solo (*pipes*).

Em estudos de campo conduzidos na bacia do Rio Bananal, desenvolvidos em encostas de cabeceiras de drenagem localizadas à montante de voçorocamentos ativos, COELHO NETTO et al (1988) e DEUS (1991) descrevem um mecanismo de erosão em túnel associado à formação de fluxos sub-superficiais em dutos escavados pelas formigas saúvas. Os monitoramentos de campo foram conduzidos a partir de chuvas naturais e artificiais em encostas recobertas por gramíneas (ambiente de pastagens) onde prolifera-se a formiga saúva. Em túneis localizados em cortes de estrada foram registradas vazões de descarga de até 5 litros em resposta a um único evento de precipitação. Os mesmos autores apontam que foram observados vários pontos de exfiltração nas paredes da voçoroca durante os eventos de chuva de maior intensidade, corroborando esse mecanismo como fundamental na determinação das taxas de recuo remontante do voçorocamento.

Voçorocamentos em cabeceiras de drenagem e evolução regressiva da rede de canais

As cabeceiras de drenagem constituem-se em áreas não canalizadas com a topografia côncava para cima, sendo definidas na literatura internacional como "*hollow*" a partir do trabalho de HACK (1960). No Brasil essas áreas côncavas localizadas nas cabeceiras foram inicialmente definidas como "rampas" por MEIS & MONTEIRO (1979) ou simplesmente "concavidades" por AVELAR & COELHO NETTO (1992a e 1992b).

A extremidade dos canais, que progridem remontante pelos fundos dos vales não canalizados das concavidades, é denominada de "cabeça do canal" sendo definidos na literatura internacional como "channel head" (DIETRICH & DUNNE, 1993) ou "stream head" (KIRKBY, 1994).

COELHO NETTO (2003), a partir de pesquisas conduzidas na área laboratório da bacia do rio Bananal propõe uma tipologia de concavidades em cabeceiras de drenagem, apontando a ocorrência de Concavidades Abertas, Concavidades Estruturais e Concavidades Estruturais Suspensas. Segunda a referida autora a propagação das voçorocas pelo eixo dessas concavidades, representam a própria expansão da rede de drenagem.

A expansão da rede de canais é considerada fundamental para o modelado do relevo, afetando diretamente os processos hidrológicos operantes nas encostas. Nos trabalhos de HORTON (1945) e DUNNE (1970 e 1980) evidencia-se o controle da dissecação fluvial na produção do relevo, devido às relações existentes entre os processos fluviais e os de encosta no modelado das bacias de drenagem.

Segundo DIETRICH & DUNNE, (1993) a expansão de canais representa aumento da densidade de drenagem da bacia, expondo maior quantidade de material aos processos de erosão fluvial, e afetando os processos de dissecação do relevo.

MONTGOMERY & DIETRICH (1989) apresentam um modelo de iniciação de canais que se baseia numa relação inversa entre o gradiente das encostas a montante da cabeça do canal e a área de contribuição do mesmo. Dessa forma, com o aumento do gradiente nas encostas necessita-se de uma área de contribuição menor para se formarem fluxos hidrológicos com potencial erosivo suficiente para dissecar um canal.

Segundo esse modelo, as taxas de recuo remontante da cabeça do canal seriam reduzidas na medida em que o mesmo se aproxima dos divisores topográficos. Dessa maneira os canais avançariam até uma distância crítica dos divisores (controlada pelos parâmetros gradiente e área de contribuição) onde cessariam a sua evolução.

AVELAR E COELHO NETTO (1992a) discutem a formação de canais em cabeceiras de drenagem com controle lito-estrutural na região do médio vale do Rio Paraíba do Sul, apontando o papel dos fraturamentos sub-verticais na orientação da rede de drenagem. Os autores discutem o papel das estruturas geológicas na circulação dos fluxos sub-superficiais, considerando as fraturas como zonas de fluxos ascendentes (artesianismo) do aqüífero regional. Esses fluxos podem gerar poro-pressões críticas nas faces de exfiltração localizadas nas cabeças dos canais, promovendo a erosão remontante por *seepage erosion,* tal qual proposto por DUNNE (1970).

COELHO NETTO (1999) sintetizando estudos conduzidos na Bacia do Rio Bananal sugere que, localmente e regionalmente, as taxas de recuo dos canais incisos (voçorocas) variam em função da densidade de concavidades vezes o gradiente das suas respectivas áreas de contribuição. COELHO NETTO (2003) indica que a expansão da rede de canais incisos envolve a ação de ambos os aqüíferos, regional e temporário, na produção de fluxos sub-superficiais responsáveis pela progressão remontante dos canais incisos.

COELHO NETTO et al. (1988) observaram na bacia do rio Bananal que as voçorocas expandem a remontante através dos eixos dos fundos de vales não-canalizados (unidades côncavas), característicos das zonas de cabeceiras de drenagem. Essa expansão tende a avançar através dos eixos das concavidades principais, em direção as concavidades de ordem hierárquica inferior, podendo, sob certas condições, romper e recuar os divisores topográficos, e promovendo capturas de drenagem (COELHO NETTO e FERNANDES, 1990).

Um modelo evolutivo de voçorocas em cabeceiras de drenagem com controle lito-estrutural foi proposto a partir dos trabalhos de COELHO NETTO et al (1988) e COELHO NETTO & FERNANDES (1990), na tentativa de compreender a evolução geomorfológica em escala regional (compartimento de colinas do médio vale do Rio Paraíba do Sul), que pode apresentar, em alguns casos, capturas de drenagem e inversões de relevo.

O referido modelo descreve uma sucessão de fases de dissecação (incisão linear e recuo lateral) por sobre depósitos aluvio-coluvionares, coluvionares e saprolíticos, governados por mecanismos de voçorocamento que progridem remontante pelos eixos das concavidades em direção aos divisores topográficos. Nos eventos e/ou períodos de precipitação mais intensa, forma-se um aqüífero temporário na base dos depósitos quaternários suspenso em relação ao aqüífero regional.

Esses fluxos sub-superficiais laterais provocam erosão pelo mecanismo de *seepage erosion*, quando são produzidas poro-pressões críticas nas faces de exfiltração localizadas nas paredes do voçorocamento. O modelo descreve ainda, movimentos gravitacionais, solapamento das bordas e lavagem superficial como mecanismos secundários na remoção do material, fazendo parte do processo geral de dissecação produzido pelas voçorocas nessas cabeceiras de drenagem.

Quando o recuo remontante se aproxima da porção superior dessas cabeceiras de drenagem e a incisão linear passa a dissecar o saprolito (rocha alterada) e atinge o aqüífero regional, torna-se possível a transferência da água subterrânea (*pirataria*) entre vales adjacentes, notadamente naqueles com desnivelamento topográfico. Estudos mais recentes, conduzidos no compartimento de colinas da bacia do Rio Bananal por LEAL (2004), indicam a transposição de água subterrânea entre vales de cabeceiras adjacentes.

A partir desse momento na dinâmica evolutiva a voçoroca pode passar a catalisar fluxos provenientes do aqüífero regional, muitas vezes através de artesianismo por fraturas sub-verticais no substrato rochoso, passando a apresentar fluxo perene no seu canal, mesmo após longos períodos de estiagem. Esses fluxos podem intensificar a progressão remontante das voçorocas que ao se aproximarem dos divisores alteram os gradientes topográficos das cabeceiras (ROCHA-LEÃO, 2005) podendo incrementar a dinâmica erosiva e causar a destruição dos divisores com posterior capturas de drenagens, como apontado por COELHO NETTO (2003).

MÉTODOS e TÉCNICAS

A partir de mensurações anteriores conduzidas pelo GEOHECO foram estabelecidas às taxas de recuo da voçoroca Bela Vista entre 1982 e 1994, sumarizadas por COELHO NETTO (1997).

Esses contornos foram obtidos através de topografia convencional, com o uso de poligonais estabelecidas por teodolito, que produziram o levantamento Plani-altimétrico da EEBV em 1982 e serviram de base para os levantamentos posteriores. A partir de então mais três contornos (perímetro da voçoroca) foram obtidos, nos anos de 1984, 1987, 1994 pela equipe do GEOHCO, revelando uma progressão preferencial em três canais-dígitos tributários do eixo-tronco central da voçoroca.

O monitoramento da progressão remontante, realizado através da superposição dos perímetros da voçoroca obtidos em diferentes anos, foi então focado em quatro segmentos da voçoroca, a saber: A – canal-dígito ativo da porção superior; B – Canal-dígito semi-estabilizado; C – canal-dígito ativo da porção inferior; D – recuo lateral do eixo tronco-central.

O cálculo de taxas para diferentes segmentos da voçoroca permite a visualização da erosão regressiva diferencial promovida pelo voçorocamento, que segue rotas preferenciais de expansão remontante em função de fatores ligados a dinâmica hidrológica sub-superficial e as características dos materiais. Permite ainda discutir o processo de dissecação promovido pela voçoroca, relacionando as taxas de incisão linear, recuo lateral e progressão remontante.

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, esses levantamentos anteriores foram digitalizados no software *AUTOCAD*, gerando um arquivo com a superposição dos contornos. Em 1999, no inicio do desenvolvimento desse trabalho, foi obtido um contorno através da utilização de DGPS de precisão métrica (MARCH I – CORVALIS).

Com o geo-referenciamento de alguns pontos de amarração dos levantamentos anteriores, foi possível integrar esses levantamentos ao sistema de posicionamento implantado para a presente pesquisa em uma base digital (Figuras 29 e 30).

Após a digitalização dos levantamentos anteriores no AUTOCAD, foram obtidas novas medições do contorno em 1999, 2001 e 2002, possibilitando o cálculo das taxas de recuo em m^2/ano durante todo o período de monitoramento (1982 - 2002).

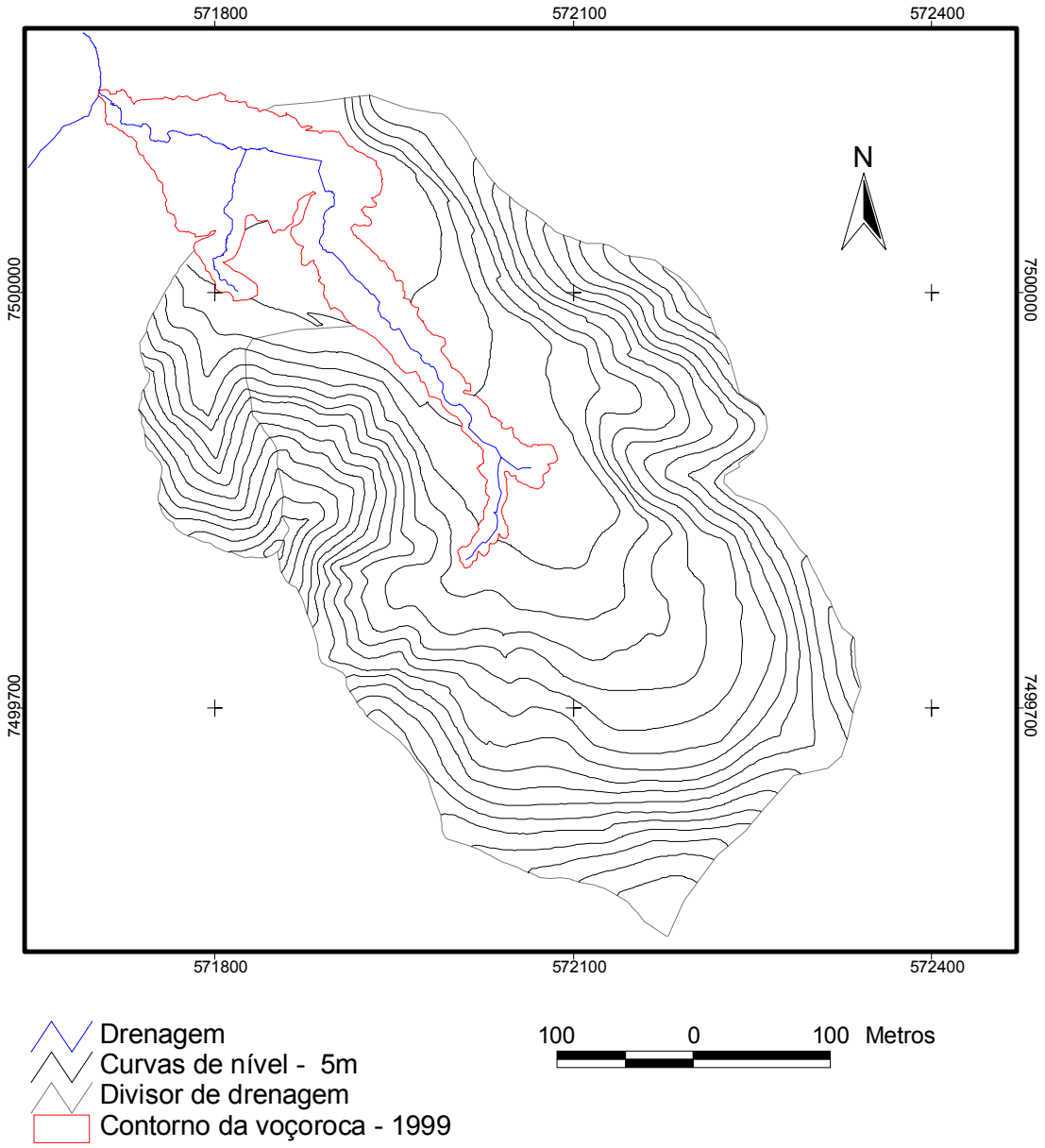
As mensurações topográficas realizadas no canal da voçoroca em 1982 e que foram obtidas pelo sistema de poligonação tradicional via teodolito, forneceram dados plani-altimétricos em toda extensão dos canais internos da voçoroca (eixo principal e dígitos), possibilitando a reconstituição de seu perfil topográfico interno de 1982. Nesse perfil foram identificados dois níveis de base locais (rupturas de declive), que segundo COELHO NETTO et al (1988) regulam os gradientes topográficos dentro da voçoroca e afetam a propagação do voçorocamento.

Foram então conduzidos dois levantamentos de campo, nos meses de julho de 2000 e 2001, para se realizar os perfis topográficos do fundo da voçoroca, saindo da confluência com o rio piracema e indo até os dígitos das porções superiores, nas cabeceiras do anfiteatro da EEBV (Figura 30). Esses levantamentos foram realizados com nível manual de precisão centimétrica, miras graduadas e trena de 50 m e como não apresentaram variação foi utilizado apenas o de 2001 no presente trabalho.

O controle planimétrico foi estabelecido por DGPS (MARCH I – CORVALIS), estabelecendo coordenados nos pontos de mudança de direção do caminhamento interno pelo canal da voçoroca. Foram registradas por esse método as rupturas de declive (níveis de base locais) no canal da voçoroca, permitindo a comparação com o perfil interno de 1982 e demonstrando o recuo lateral e a incisão linear desses níveis de base locais localizados dentro da voçoroca.

Foram identificados dois níveis de base locais (NB1 e NB2) no eixo-tronco central da voçoroca, o primeiro na transição entre a porção inferior e a porção central da voçoroca e o segundo na porção superior. Acima do NB2, que foi destruído e dissecado pelo canal da voçoroca durante a década de 1980 e recuou para sua localização atual no canal-dígito semi-estabilizado, propagaram-se dois níveis de base locais dentro do canal-dígito ativo da porção superior (NB2a e NB2b).

A comparação dos perfis internos de 1982 e 2001 permitiu ainda, comparar os gradientes topográficos nas encostas nesses dois momentos distintos (1982 e 2001) e calcular as taxas de incisão promovida pelo voçorocamento no eixo principal e nos canais-dígitos da voçoroca.



RESULTADOS

Evolução regressiva da voçoroca da Bela Vista: taxas de recuo entre 1982 e 2003

As taxas de progressão remontante (ou recuo remontante) da voçoroca da EEBV foram monitoradas pela equipe do GEOHECO nos últimos 25 anos. O monitoramento foi conduzido através da determinação do perímetro da voçoroca, que foram obtidos em levantamentos de campo realizados em 1982, 1984 1987, 1994. O monitoramento foi complementado no presente trabalho com novos perímetros, que foram obtidos em 1999, 2001 e 2002.

Os resultados demonstraram diferenças nas taxas de recuo remontante da voçoroca entre os períodos monitorados, e também entre as taxas de recuo dos três principais canais dígitos tributários da voçoroca em um mesmo período. Ao mesmo tempo, identificou-se que a dinâmica hidrológica subterrânea (através da ação do aqüífero regional e temporário)

conforme apontado anteriormente por COELHO NETTO et al (1988) é a responsável pelos fluxos sub-superficiais que promovem o mecanismo principal de propagação da voçoroca.

A figura 2a revela a progressão remontante da voçoroca entre 1982 e 1999 e a figura 2b indica a progressão entre 1999 e 2002. As respectivas figuras demonstram uma aceleração nas taxas de recuo entre 1994 e 1999. Nesse período, ocorreu um incremento nas taxas de recuo no dígito ativo da porção superior, que havia bifurcado do tronco central a partir de 1984, passando a progredir em direção as cabeceiras do anfiteatro, em uma direção coincidente com uma das orientações principais do set de fraturamento do substrato geológico local. Nessa direção, encontram-se as cabeceiras de um vele adjacente, que é suspenso topograficamente em relação às cabeceiras da EEBV.

COELHO NETTO (1999) sugere que a aceleração nas taxas de recuo que foram registradas no digito ativo da porção superior entre 1987 e 1994 pode estar associada à pirataria de água subterrânea do vale adjacente, destacando ainda a presença de uma maior densidade de concavidades na área de contribuição desse dígito e uma possível resistência diferencial dos materiais que poderiam controlar o recuo dos níveis de base locais no canal inciso da voçoroca.

Esse recuo é promovido pelo solapamento na base das paredes e posterior desmoronamento das mesmas, que são refletidos no aumento do perímetro da voçoroca. Todo esse processo depende da dinâmica sub-superficial que controla a magnitude dos fluxos que exfiltram na cabeça desses canais, causando erosão remontante por *seepage erosion* (COELHO NETTO et al 1988).

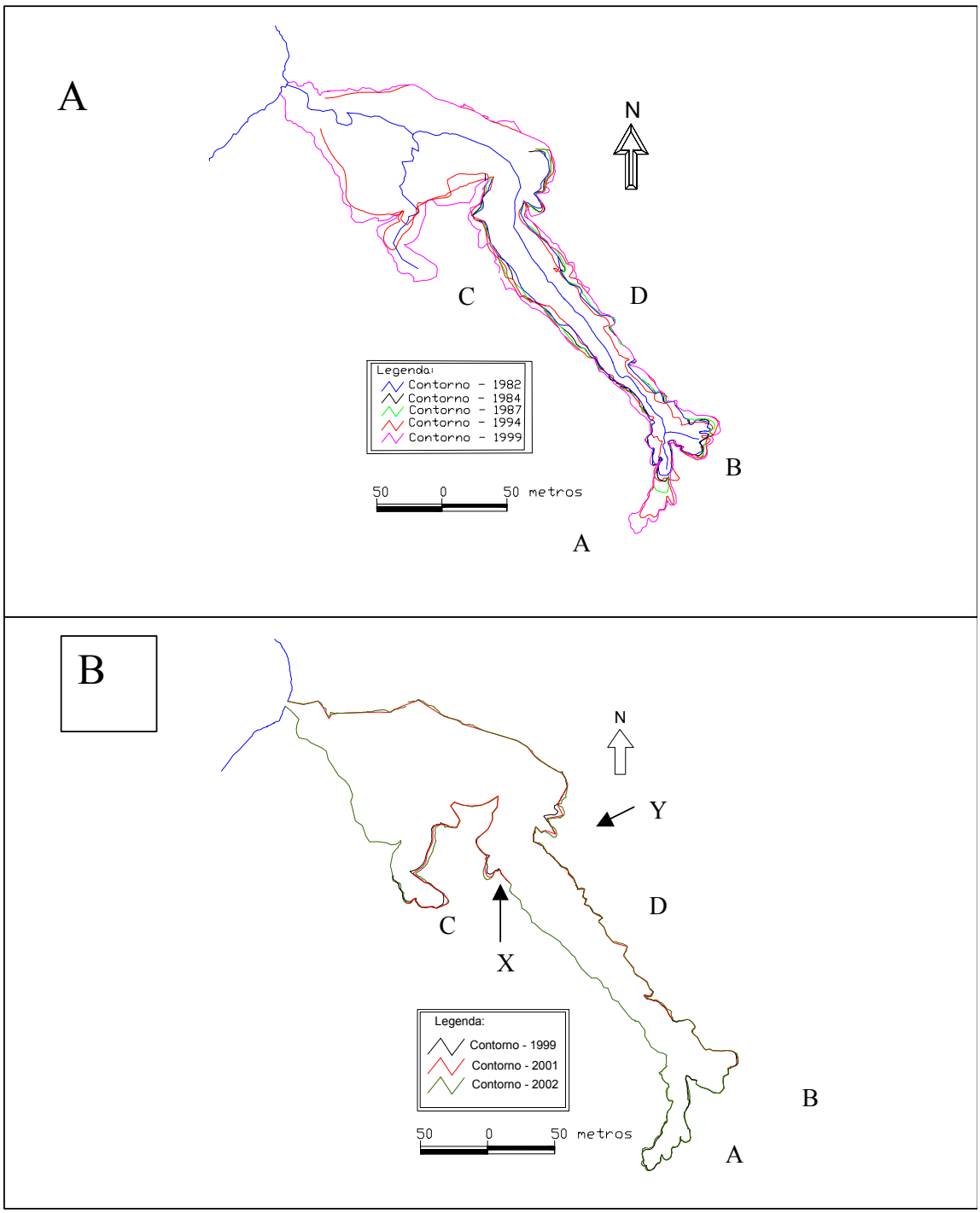
Na Figura 2 observa-se que entre 1982 e 1984 as taxas de recuo foram maiores no dígito ativo, que começou a se bifurcar do tronco-central. Com a incisão no nível de base local localizado na porção superior do eixo-tronco central entre 1984 e 1987 a diferença entre as taxas diminuiu, com o dígito do tronco central progredindo em taxas de recuo próximas as registradas pelo seu tributário.

COELHO NETTO (2003) aponta que no final da década de 1980 o contato entre uma camada coluvial de textura argilosa sobrejacente a um aluvio-coluvio de textura arenosa, produziu uma resistência diferencial à incisão do canal da voçoroca na porção superior do voçorocamento. Tal fato formou um nível de base local que manteve a porção superior da voçoroca suspensa aproximadamente 1m em relação ao eixo do tronco central.

Tabela 1– Taxas de recuo remontante (m2/ ano) em diferentes setores da voçoroca entre 1982 e 2002.

	1982/1984	1984/1987	1987/1994	1994/1999	1999/2001	2001/2002
Dígito - A	47,25	38,20	47,9	59,0	0	9,7
Digito - B	15,90	32,00	21,80	15,85	3,4	3,3
Digito - C	--------	--------	--------	196,10	15,5	20.1
Eixo-tronco - D	183,45	115,10	102,05	270,90	-	-

Nota - Dígito A = dígito ativo da porção superior; Digito B = digito semi-estabilizado da porção superior; Digito C = digito ativo da porção inferior sob influencia de estrada de terra; Eixo-tronco D = recuo lateral no tronco central da voçoroca entre os dois níveis de base locais (NB1 e NB2).



A partir de 1987, o dígito da cabeça do tronco-central (digito B) passou a desacelerar as taxas de recuo remontante, permitindo o desenvolvimento de uma revegetação espontânea em seu interior e atravessando um período de relativa estabilidade geomórfica até os dias atuais, passando por isso a ser denominado dígito semi-estabilizado. Dentro desse dígito se estabeleceu uma vegetação secundária inicial predominantemente arbórea que, no entanto, não garante a estabilidade geomórfica da voçoroca.

Entre 1987 e 1994 as taxas de recuo voltam a crescer no dígito ativo da porção superior (47,9m2 /ano) que continuou progredindo aceleradamente entre 1994 e 1999, através das maiores taxas registradas nessa porção da voçoroca em todo período de monitoramento (59m2/ano).

Destaca-se que esse período de aceleração nas taxas de recuo remontante do dígito ativo foi posterior a incisão linear e ao recuo remontante do nível da base local, que havia se formado em função de uma resistência diferencial entre os coluvios e as camadas de

aluvio-coluvios subjacentes, quando a incisão do canal da voçoroca atingiu o contato entre essas camadas.

Com o recuo desse nível de base local a incisão atingiu as camadas aluvio-coluvionares da porção superior da cabeça da voçoroca, que foram registradas pelas análises estratigráficas conduzidas por COELHO NETTO et al (1994) para essa porção do anfiteatro detonando uma fase de rápida dissecação e, conseqüentemente, de progressão remontante desse dígito da voçoroca.

No mesmo período ocorreu uma desaceleração nas taxas de recuo do dígito semi-estabilizado, e o voçorocamento passou a progredir visivelmente em uma direção preferencial que é coincidente com uma das direções do set de fraturamento local.

Além disso, pela nova rota de expansão da voçoroca o dígito ativo começou a se aproximar do divisor topográfico com um vale de cabeceira adjacente, que é suspenso topograficamente.

Essa aceleração nas taxas de recuo do digito ativo da porção superior se deu mesmo com uma expressiva redução na área de que passou de 42.392 m2 em 1982 para 9.972 m2 em 2001, indicando que os parâmetros morfológicos (área de contribuição e gradiente das encostas) indicados por MONTGOMERY & DIETRICH (1989) para definir a expansão da rede de drenagem, parecem não se aplicar à expansão do canal-dígito em questão.

No caso da EEBV, onde o aqüífero regional é o responsável pela exfiltração de fluxos sub-superficiais dentro da voçoroca, os contornos topográficos não parecem ser o único controle da área de contribuição de drenagem para os canais-dígitos do voçorocamento.

Considerando que ocorreu um aumento nas taxas de recuo associadas à diminuição da área de contribuição, torna-se fundamental mapear o aqüífero regional, identificando sua ação nessa porção da bacia e delimitando divisores de água subterrânea entre cabeceiras adjacentes, notadamente naquelas com desnivelamento topográfico.

Esse fato torna-se relevante, pois as condições observadas nas cabeceiras da EEBV são representativas em escala regional, pelo menos para o compartimento de colinas do médio vale do Rio Paraíba do Sul, e aparentemente essas rotas de fluxos subterrâneos são fundamentais para o direcionamento e a velocidade das taxas de recuo remontante em voçorocas que se propagam em cabeceiras de drenagem.

Entre 1999 e 2002 as taxas de recuo foram drasticamente reduzidas nos dois dígitos da porção superior (ativo e semi-estabilizado) com o voçorocamento passando por um período de relativa estabilidade, refletido na recolonização vegetal do seu interior, embora, principalmente no dígito ativo, essa revegetação não seja continua, permanecendo amplas áreas livres para ação dos mecanismos de erosão superficial.

Esse período de estabilidade pode ser explicado pelo efeito da própria progressão remontante da voçoroca, que promoveu um rebaixamento do nível freático nas cabeceiras. Esse rebaixamento dificulta a formação de faces de exfiltração nas paredes da voçoroca que se encontram suspensas em relação ao atual nível freático.

As condições propícias para formação de um aqüífero temporário suspenso em relação ao nível freático não ocorreram nesse período devido a falta de eventos de chuva de alta intensidade no período de elevação do aqüífero regional (após a estação chuvosa) e ao rebaixamento da zona capilar, que acompanhou a descida do nível freático, dificultando a formação de fluxos sub-superficiais na zona de contato entre a frente de molhamento (recarga local) e a zona de ascensão capilar controlada pelo aqüífero regional.

Taxas de incisão no canal do eixo-tronco central da voçoroca

O recuo dos níveis de base locais foi monitorado através da comparação do perfil interno da voçoroca, extraído do levantamento topográfico realizado em 1982, com dois perfis internos

registrados por mensurações de campo em 1990 (COELHO NETTO, inédito) e em 2001 (no presente trabalho). Foram então registradas as taxas de incisão linear total no fundo do canal da voçoroca entre os períodos (1982-1990 e 1990-2001) para o eixo-tronco central e para os dois dígitos tributários da porção superior. Foram também registradas as taxas de recuo remontante dos degraus topográficos (níveis de base locais) no canal da voçoroca.

As Tabelas 2 e 3 revelam a incisão linear nos diferentes segmentos da voçoroca, revelando uma profunda incisão no digito ativo da porção superior, que modificou o gradiente topográfico das encostas situadas a montante da cabeça do canal desse dígito tributário. Revela ainda uma dissecação expressiva no canal do eixo-tronco central da voçoroca, na área localizada a jusante do nível de base da porção superior (NB2), principalmente entre 1982 e 1990. A partir de 1990 foram reduzidas as taxas de incisão linear nesse trecho do canal, iniciando-se uma etapa de dissecação preferencial nos dígitos da porção superior, especialmente no canal-dígito ativo.

Tabela 2 – Taxas de incisão linear no canal do weixo principal da voçoroca da Estação Experimental da fazenda Bela Vista

Taxa de Incisão Linear	Dígito Ativo (A)	Dígito Semi-estabilizado (B)
Total no Período (m)	1,008	1,77
Taxa anual (mm/ano)	336	93

Tabela 3 - Taxas de incisão linrear nos canais dígitos tributários da porção superior da voçoroca da Estação Experimental da Fazenda

Taxa de Incisão Linear	1982 -1990	1990-2001
Total no Período (m)	3,08	2,76
Taxa anual (mm/ano)	385	251

Pelo monitoramento topográfico, nota-se que quando um desses níveis de base é dissecado pelos processos erosivos, inicia-se um rápido processo de incisão linear e recuo lateral, que promove o rebaixamento do fundo do canal e propaga a montante uma onda erosiva. Ressalta-se porém que esse processo de remoção dos materiais não é uniforme dentro do canal da voçoroca, sendo possível a preservação de trechos residuais que testemunham a antiga superfície do canal, associada ao período anterior ao recuo remontante do nível de base local. Esse efeito se propaga remontante até que se atinja uma nova condição de ajuste ao novo gradiente topográfico. Esse rebaixamento do fundo do canal promove uma rápida descarga da água subterrânea nas cabeceiras podendo promover alterações no nível freático e nos gradientes hidráulicos responsáveis pela movimentação da água subterrânea.

A migração remontante desse nível de base local provocou um ajuste topográfico entre o segmento inicial do canal-dígito ativo e o canal do dígito semi-estabilizado, onde foram observados fluxos de água perenes. A zona de exfiltração da água subterrânea dentro desses canais varia ao longo do ano, em função da elevação e rebaixamento do nível altimétrico do lençol freático nas cabeceiras da EEBV que ocorrem em resposta ao regime pluviométrico.

No entanto, a montante desse nível de base local (NB2a) o fundo do canal–dígito se encontra suspenso em relação ao nível freático da cabeceira e, pelo menos entre 1999 e 2004, não foi observado fluxo de água perene no seu interior, ao contrário, todas as ocorrências de fluxo ocorreram de forma efêmera, durante e imediatamente após eventos de elevada pluviosidade. A montante desse nível de base local (NB2a) encontra-se um outro (NB2b) já nas proximidades da cabeça do dígito ativo, que suspende o fundo do canal-dígito ainda mais em relação ao ponto de bifurcação com o dígito semi-estabilizado.

A mensuração do perfil interno em 2000, revelou a existência de dois níveis de base locais no canal do digito ativo da voçoroca (N.B.2a e NB2b). Esses dois níveis de base locais

suspendem o fundo do canal do digito ativo em cerca de 2m em relação ao fundo do canal do digito semi-estabilizado, que é ajustado ao atual nível freático da cabeceira e apresentou fluxo perene de água durante todo o período de monitoramento.

Portanto, a distribuição espacial desses níveis de base locais afetam toda dinâmica hidro-geomórfica da voçoroca, ao definir diferentes segmentos do canal (no interior do eixo-tronco e dos canais dígitos tributários) que se ajustam a cotas altimétricas distintas, e por isso, sofrem um efeito diferencial da hidrologia subterrânea.

Esses níveis de base locais são rupturas de declive abruptas no fundo do canal, estando associados à dissecação de camadas com propriedades diferentes e acabam formando degraus no fundo do canal da voçoroca. Esses níveis de base internos no canal da voçoroca alem de alterarem o gradiente topográfico nas encostas laterais, afetam também a sedimentação no fundo da voçoroca, promovendo uma estocagem diferencial dos sedimentos colapsados das paredes e remobilizados pelo fluxo de água no canal da voçoroca.

Pelo monitoramento topográfico, nota-se que quando um desses níveis de base é dissecado pelos processos erosivos, inicia-se um rápido processo de incisão linear e recuo lateral, que promove o rebaixamento do fundo do canal e propaga a montante uma onda erosiva. Ressalta-se porém, que esse processo de remoção dos materiais não é uniforme dentro do canal da voçoroca, sendo possível a preservação de trechos residuais que testemunham a antiga superfície do canal, associada ao período anterior ao recuo remontante do nível de base local. Esse efeito se propaga remontante até que se atinja uma nova condição de ajuste ao novo gradiente topográfico. Esse rebaixamento do fundo do canal promove uma rápida descarga da água subterrânea nas cabeceiras podendo promover alterações no nível freático e nos gradientes hidráulicos responsáveis pela movimentação da água subterrânea.

A progressão remontante de voçorocamentos em vales de cabeceiras de drenagem pode modificar os processos de estocagem da água subterrânea, através do rebaixamento do nível freático dessas cabeceiras. O recuo remontante da cabeça da voçoroca e a incisão vertical ao longo de seu canal alteram os gradientes topográficos e hidráulicos nas encostas, podendo causar uma modificação na descarga para os canais fluviais. O recuo remontante acaba reduzindo a capacidade das encostas de estocarem água, podendo alterar, inclusive, o regime hidrológico de bacias hidrográficas.

Esse fato torna-se mais grave, pois muitos vales de cabeceiras de drenagem, fundamentais para a regulagem dos fluxos hidrológicos dos canais nas bacias de drenagem, são regulados pelos fluxos subterrâneos. Esses fluxos são responsáveis pela maior parte da vazão desses canais (fluxo de base), sobretudo nos períodos de estiagem, quando diminuem ou cessam as contribuições superficiais e sub-superficiais rasas, comuns nos períodos de chuva.

HILL (1990) em estudo sobre o funcionamento hidrológico de cabeceiras de drenagem no noroeste dos EUA, destaca o importante papel exercido pelos voçorocamentos no regime hidrológico das bacias, causando uma rápida descarga de água subterrânea para os canais fluviais e afetando a disponibilidade de água nos períodos de estiagem.

Na Estação Experimental da Fazenda Bela Vista (EEBV) as taxas de recuo lateral e incisão vertical que foram registradas entre 1982 e 2001 foram refletidas em alterações no comportamento das cargas de pressão do aqüífero regional (ROCHA LEÃO, 2005), sendo que os registros de campo indicam uma redução significativa nos valores de carga de pressão entre 1996-97 e o período de monitoramento mais recente (2000 – 2004). Ressalta-se ainda, que o período chuvoso na qual foram registrados os menores valores de carga de pressão, coincidem com momentos de relativa estabilidade desse dígito da voçoroca, sugerindo uma relação direta entre o comportamento da água subterrânea nas cabeceiras da EEBV, e o ritmo de propagação remontante do voçorocamento.

No entanto, as variações nas cargas de pressão nessa estação, localizada nas cabeceiras da EEBV, não podem ser creditadas somente a alterações no nível freático causados pela progressão da voçoroca, pois variações no regime pluviométrico nos períodos chuvosos mensurados também contribuem para as modificações no comportamento da hidrologia subterrânea.

REFERÊNCIAS

AVELAR, A.S. & COELHO NETTO, A.L "Fraturas e desenvolvimento de unidades côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul". Rev. Bras. De Geociências, v22n.2, 1992a.

AVELAR, A.S. & COELHO NETTO, A.L. "Fluxos d'água sub-superficiais associados a origem das formas côncavas do relevo" . Anais da 1a conferência Brasileirade Estabilidade de Encostas/COBRAE, ABMS e SBGE, Rio de Janeiro; vol.2:709-719,1992b.

BLONG, R. J., GRAHAM, O.P.; VENESS, J. A. "The role of sidewall processes in gully development: some N.S.W. examples" In Earth Surface Processes and Landforms. VOL. 7, 381-385p, 1982.

BRICE, J. C. "Erosion and depositionin the loess-mantled Great Plains, Medicine Creek drainage basin, Nebraska". U.S. Geological Survey Professional Paper 352-H, p.255-339,1966.

BURKARD, M.B. & KOSTASCHUK, R.A. "Patterns and controlsof gully growth along the shoreline of Lake Huron" in Earth surface Process and landform, VOL.22, 901-911p,1997.

COELHO NETTO, A.L.; FERNANDES, N.F.& DEUS,C.E. "Gulling in the southeastern Brazilian Plateau Banana,SP" Sediment Budgets, edited by M.R. Bordas e D.E. Walling; IAHS Publication no.174: 35-42 ,1988.

COELHO NETTO, A. L. "Catastrophic landscape evolution in a humid region (SE Brasil): inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes ". Fourth International Conference on Geomorphology – Italy, 1999.

COELHO NETTO, A. L. "Evolução de cabeceiras de drenagem no médio vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação eo crescimento da rede de canais sob controle estrutural" . Revista Brasileira de Geomorfologia, Ano 4 N2 69 – 100,2003.

DIETRICH, W. E. & DUNNE T. "The Channel Head". In: K. Beven and M. J. Kirkby (Ed). Channel Network Hydrology. Wiley, N.Y. pp.176-219, 1993.

DEUS,E. "O papel da escavação das formigas do gênero Atta na hidrologia de encostas em áreas de pastagem – Bananal (SP)" Tese de Mestrado IGEO/UFRJ 253p, 1991.

DUNNE, T. "Runoff production in a humid area" Phd Thesis, Agricultural Research Service-EUA, 108p, 1970.

DUNNE, T. "Formation and controls of channel networks" Prog. Phis. Geogr. 4 221-239, 1980.

DUNNE, T. (1990) "Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow". In: Higgins, C. G. and Coates, D. R., eds., Groundwater geomorphology; The role of subsurface water in Earth-Surface Processes and Landforms: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 1990, 252p.

JONES, J.A.A. "Piping effects in humid lands" In: Higgins, C. G. and Coates, D. R., eds., Groundwater goemorphology; The role of subsurface water in eatrh-surface processes and landforms: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 252 111-1990, 137p.

HACK, J.T " Interpretation of erosional topogaphy in Humid temperate regions". American Journal of Science, 188p - 80-97p, 1960.

HILL B.R. " Groundwater Discharge to a Headwater Valley, Northwestern Nevada, U.S.A". Journal of Hydrology 113, 265-283p, 1990.

HORTON, R.E. "Erosional development of streams and their drainage basins; hidrophisical approach to quantitative morphology". Geol. Soc. Am. Bull v56, 144-152, 1945.

LEAL,P.J. "Relação entre fluxos subterrâneos de vales vizinhos e a expansão da rede de drenagem via voçorocamentos na bacia do Rio Bananal, SP". Dissertação de Mestrado – Programa de pós-graduação em geografia, IGEO/UFRJ, 133p, 2004.

MEIS, M.R.M. e MONTEIRO, A. M.F. "Upper Quaternary "rampas", Doce River Valley, SE Brazilian Plateau". Zeitschr. Fur. Geomorph.,23: 132-151, 1979.

MONTGOMERY, D.R. & DIETRICH, W.E. "Where do chnnels begin?" Nature 336 (6196) p232-234, 1989.

ROCHA-LEÂO,O.M. " Evolução regressiva da rede de canais por fluxos de água subterrânea em cabeceiras de drenagem: bases geo-hidroecológicas para recuperação de áreas degradadas com controle de voçorocamentos." Tese de doutorado – PPGG/ IGEO-UFRJ, 247P, 2005.